

## Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme

*Toutes les études de prospective énergétique menées à l'horizon 2030 convergent sur un maintien de la part du pétrole dans le bilan énergétique mondial à hauteur de 40 % et sur une forte croissance de la demande pétrolière (+ 60 %) d'ici à 2030, tirée par les pays en voie de développement. Dans ce contexte d'augmentation de la consommation pétrolière mondiale, un des défis majeurs des industries pétrolière et automobile est de limiter la progression des émissions de CO<sub>2</sub> du transport routier en mettant en œuvre des solutions technologiques innovantes, aussi bien en termes de motorisation que de sources d'énergie.*

Sur les 30 prochaines années, c'est la demande énergétique associée aux transports, après celle de la production d'électricité, qui devrait progresser le plus rapidement. Aujourd'hui, ce secteur économique utilise presque exclusivement des produits pétroliers. Cette dépendance pose à plus ou moins long terme des questions fondamentales : le rythme de renouvellement des réserves pétrolières permettra-t-il d'assurer un approvisionnement suffisant et pourra-t-on développer les moyens de réduire les émissions de gaz à effet de serre que cette activité génère. Cette période pourrait également voir émerger industriellement des solutions alternatives pour infléchir la hausse inexorable des émissions de CO<sub>2</sub> et construire la transition de l'après pétrole.

### La lutte contre les pollutions locales et globales est devenue incontournable

Depuis les années 70, les industries pétrolières et automobiles européennes se sont attaquées à la diminution des polluants locaux : monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatils dont les hydrocarbures imbrûlés (COV, HC), oxydes d'azote (NOx), particules (PM) et ozone (cause de la plupart des pics de pollution estivaux). Cette action s'est inscrite dans une démarche visant à répondre aux exigences et aux réglementations mises en place par les pouvoirs publics, notamment en Europe mais aussi aux États-Unis. Ce processus continu, qui touche maintenant un grand nombre de pays en développement, devrait conduire à une forte baisse de la pollution liée aux rejets des pots d'échappement.

Au cours des 30 dernières années, les émissions de polluants locaux des véhicules neufs ont été réduites dans un facteur 10 à 100. Parmi les évolutions marquantes au plan technologique

qui ont permis une telle évolution, les développements suivants méritent d'être mis en exergue :

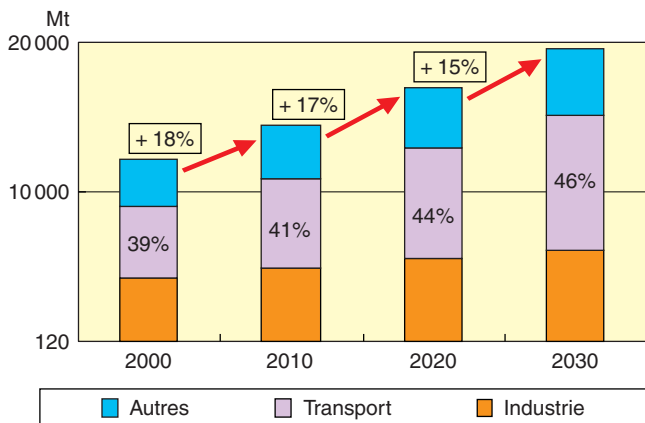
- la généralisation de l'essence sans plomb et la diminution de la teneur en benzène ;
- le pilotage électronique des grands paramètres du contrôle moteur et l'amélioration des systèmes d'injection et de la combustion ;
- la « systématisation » des pots catalytiques pour les véhicules à allumage commandé (essence) à partir des années 90, dont l'efficacité devrait encore progresser ;
- enfin, les diminutions progressives des teneurs en soufre des carburants qui vont être abaissées à nouveau en 2005 (50 ppm) et 2008 (10 ppm).

Le législateur européen, aujourd'hui à l'initiative de toutes les réglementations, va poursuivre les efforts de réduction de ces polluants, en particulier les oxydes d'azote, l'ozone et les particules. Cette politique porte ses fruits même si le taux de renouvellement du parc automobile et l'accroissement du trafic peuvent en masquer partiellement l'impact. Les émissions de CO<sub>2</sub> n'ont pas suivi cette tendance et vont constituer aujourd'hui l'axe principal des actions des pouvoirs publics.

En effet, selon le scénario de référence de l'AIE (scénario tendanciel qui n'inclut pas de politique volontariste dans le domaine), les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> du secteur de l'énergie devraient progresser de 23 Gt en 2000 à 27 Gt en 2010 pour atteindre 38 Gt en 2030 : cette progression de près de 65 % sur la période 2000-2030 serait principalement concentrée dans les deux secteurs de la production d'électricité et des transports. Lorsqu'on décompose les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> par secteur, la part des transports devrait ainsi augmenter de 40 % en 2000 à 45 % en 2030.

# Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme

Fig. 1 Émissions mondiales de CO<sub>2</sub> par secteur (Mt)



Source : AIE 2002

IFP/DEE, 2003

Même si ces scénarios ont plus pour vocation d'alimenter les réflexions sur des futurs possibles que prédire l'avenir, il apparaît clairement une nécessité d'action en la matière.

La diminution des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre liées aux transports passera par des avancées technologiques, même si les aspects sociétaux (modes de transport, urbanisme, etc.) seront également déterminants. **Aujourd'hui, il ne se dégage pas clairement de solutions technologiques uniques mais plutôt un ensemble de possibilités** qui doivent être examinées et pourrait être combinées pour répondre aux problèmes des gaz à effet de serre.

Le transport routier est ainsi un système où les développements moteurs et carburants sont interdépendants.

## Une multitude de réponses : des carburants d'aujourd'hui...

À l'échelle mondiale, les carburants issus du pétrole constituent 98 % de l'énergie utilisée par les transports routiers (100 % dans le domaine aérien à l'exception du « spatial »). Ces carburants ont déjà fait l'objet de nombreuses améliorations et, au-delà des évolutions déjà programmées, il n'est pas exclu que de nouvelles spécifications soient mises en œuvre d'ici à 2020, soit pour répondre aux objectifs de qualité de l'air de l'Union européenne, soit pour répondre aux éventuelles exigences de nouveaux modes de combustion des moteurs à allumage commandé et Diesel (CAI, HCCI, etc.).

Au-delà, pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des automobiles, une voie d'action consiste à mettre en œuvre ce qu'on appelle des énergies alternatives. Certaines sont déjà utilisées depuis fort longtemps, initialement le plus souvent pour

réduire les pollutions ou réduire une dépendance au pétrole (cas du Brésil) : le gaz naturel (GNV), les gaz de pétrole liquéfiés (GPL) et les biocarburants, ne représentant toutefois, aujourd'hui, qu'une vingtaine de Mtep, soit moins de 2 % du total de l'énergie utilisée dans les transports au plan mondial. À la fin de l'année 2003, la Commission européenne a proposé des objectifs de pénétration des carburants de substitution qui devraient représenter 23 % de la demande de carburants en 2020 : 10 % de gaz naturel, 8 % de biocarburants et 5 % d'hydrogène. Ces objectifs apparaissent aujourd'hui très ambitieux.

**Bien qu'une généralisation de l'utilisation du GPL** comme carburant automobile ne soit pas réaliste sur l'ensemble du parc, notamment pour des questions de disponibilités locales/régionales ou de réseaux de distribution, les volumes mondiaux mobilisables pour des applications au transport pourraient être à l'avenir assez importants.

**L'utilisation du GNV dans les transports** ne représente également qu'une très faible part de la consommation globale de cette source primaire d'énergie (essentiellement utilisée pour la production d'électricité et le chauffage) et du parc automobile mondial. La nécessité d'un stockage à haute pression et la mise en place d'une infrastructure relativement lourde limitent un développement de masse. Son potentiel le plus important porte sûrement sur les flottes de véhicules captifs amenées à réaliser de nombreux déplacements dans les centres urbains. Toutefois, certaines expériences de « distribution à domicile pour le particulier » font l'objet de recherches. Sur un moteur optimisé au gaz naturel, une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 5 à 10 % par rapport au moteur Diesel est possible.

**Les deux principaux biocarburants, qui font l'objet de développements industriels, sont l'ester méthylique d'huile végétale (EMHV) et l'éthanol. Leur coût est un des freins importants à une utilisation plus générale, même si du point de vue environnemental le bilan est plutôt positif, en particulier vis-à-vis du CO<sub>2</sub>.**

- Jusqu'à 5 %, l'EMHV est distribué à la pompe de manière tout à fait transparente pour l'utilisateur, et aujourd'hui, une partie des raffineries françaises l'incorpore aux carburants vendus dans des proportions variant de 2 à 5 %.
- L'éthanol a surtout été utilisé à la suite des chocs pétroliers de 1973 et 1979 comme carburant en remplacement du supercarburant au Brésil et dans une moindre mesure aux États-Unis. Dans les pays européens, l'éthanol n'est généralement pas utilisé directement comme carburant, du fait des difficultés liées au stockage du mélange et à l'impact sur la volatilité. Il est plutôt employé sous sa forme éther (ETBE : produit à partir d'isobutylène et d'éthanol).

## Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme

Toutefois, les volumes consommés par exemple en Europe restent limités, moins de 0,4 % de la consommation d'essence et de gazole de l'Union européenne, et leur développement continuera de nécessiter des subventions publiques importantes.

### aux carburants de demain...

Sur le moyen terme, la production de carburants liquides, essence et/ou gazole, peut être envisagée non plus uniquement à partir de pétrole, mais aussi à partir d'autres ressources telles que le gaz naturel, le charbon et la biomasse.

**Les technologies GTL (*Gas to Liquids*) utilisant la synthèse Fischer-Tropsch, offrent de nouvelles voies possibles de valorisation du gaz naturel avec la production de produits pétroliers de très bonne qualité.** Ces technologies intéressent de nombreux opérateurs. Le coût de ce type d'installation a été fortement réduit au cours des dernières années. Alors que les projets affichent un coût d'investissement de plus de 50 000 \$/b/j au début des années 90, le coût d'investissement des projets actuels est évalué entre 20 000 et 35 000 \$/b/j. Des progrès importants en matière de performances des procédés combinés à une augmentation sensible de la taille des projets (12 000 b/j au début des années 90, 30 000 à 75 000 b/j aujourd'hui) ont permis une telle réduction.

**De la même manière, on peut envisager la voie CTL (*Coal to Liquids*), plus coûteuse, mais réalisable techniquement :** cette solution est attrayante pour des pays possédant d'importantes ressources de charbon. Ces dernières qui représentent plus de 200 années de production au rythme actuel sont concentrées dans des pays tels que la Chine et l'Inde qui seront de plus en plus consommateurs d'énergie dans les années à venir. Une étude récente menée par l'IFP montre que, pour un prix de la tonne de charbon de 30 \$, la solution CTL peut s'avérer compétitive par rapport aux filières traditionnelles, dès lors que le prix du baril reste durablement à un niveau supérieur à 35-40 \$/b. Il est important de souligner que peu d'efforts de recherche ont été faits dans ce domaine au cours des 20 dernières années.

Cependant, ces deux filières, si elles répondent à l'objectif de réduire la part du pétrole dans les transports, ne pourront être envisagées massivement que si leurs émissions de CO<sub>2</sub> importantes sont traitées en optant par exemple pour leur capture et leur séquestration dans des formations géologiques adaptées.

**La dernière ressource envisageable pour produire des carburants liquides de type pétrolier est la biomasse (*Biomass to Liquids* ou BTL).** Dans un premier temps, les matières premières collectées sont transformées en « gaz de synthèse »

puis en produits liquides par le procédé Fischer-Tropsch pour obtenir du gazole. Pour ce produit, les coûts exprimés en Euros par tonne équivalent Diesel sont très élevés, de l'ordre de 700-800 €/tep. Cette filière en est encore au stade de la recherche-développement et d'opération de démonstration, en particulier dans le cadre de projet européen.

**Sur le long terme, l'hydrogène peut être envisagé comme un carburant.** Aujourd'hui utilisé à 99 % comme gaz industriel, l'ammoniac est aujourd'hui le secteur le plus consommateur d'hydrogène (50 %), devant le raffinage (37 %), la synthèse de méthanol (8 %) et enfin, la production d'autres spécialités chimiques. Seul 1 % du volume mondial est aujourd'hui valorisé à des fins énergétiques dans le secteur spatial. Les énergies fossiles sont les sources d'énergie les plus utilisées pour produire l'hydrogène : ainsi le vaporéformage du gaz naturel est aujourd'hui la technologie la plus communément employée pour une production en grandes quantités et à moindre coût. La production d'hydrogène par transformation de la biomasse est une voie attrayante, qui nécessite des travaux de R&D importants. Enfin, malgré son coût actuel très élevé et son rendement énergétique médiocre, l'électrolyse de l'eau est la principale voie de production de l'hydrogène à partir de composés non fossiles : toutefois, son véritable intérêt « environnemental » sera alors directement la conséquence du mode de production de l'électricité utilisé. En outre, la mise en place d'une logistique (transport par pipeline, stockage intermédiaire, stockage à bord du véhicule) soulève également des difficultés techniques et des surcoûts très importants.

Cependant, l'intérêt environnemental des carburants ne peut se mesurer réellement qu'en intégrant l'efficacité des convertisseurs, du moteur à allumage commandé au moteur électrique.

### en passant par les progrès continus des moteurs traditionnels...

L'essentiel de la réduction nécessaire des GES devra être réalisé au niveau des moyens de propulsion des véhicules. L'allègement des véhicules est une autre voie d'action mais dont l'efficacité est limitée du fait des exigences de confort et de sécurité des consommateurs

Dans les années récentes, le développement et la généralisation de l'injection directe haute pression ont permis une réduction significative des consommations unitaires des véhicules, notamment Diesel.

Le moteur Diesel, notamment grâce aux évolutions dues à l'injection directe, présente, du fait de son principe de combustion, une consommation en carburant et des émissions de CO<sub>2</sub> inférieures de 30 % environ à celles du moteur à essence

## Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme

équivalent. Cette performance associée à la pénétration croissante du moteur Diesel dans le parc automobile a, jusqu'à aujourd'hui, permis que les engagements pris par les constructeurs automobiles européens en matière de réduction des rejets de CO<sub>2</sub> soient respectés.

Le véritable enjeu du moteur Diesel sera de respecter les futures normes d'émissions de NOx et de particules qui impliquera des systèmes d'injection plus efficaces et rendra très probablement nécessaire l'installation de post-traitement à l'échappement : réduction sélective catalytique ou piège à NOx et filtres à particules, avec un couplage optimisé possible, voire un système unique (catalyse « quatre » voies).

En revanche, pour le moteur à allumage commandé, l'enjeu restera la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et donc, l'amélioration de rendement énergétique. Le recours à l'injection directe est une possibilité intéressante qui pourrait aboutir à des économies de 10 à 15 %, mais qui présente l'inconvénient de ne pas être compatible avec la catalyse trois voies et nécessiterait d'installer un post-traitement de type piège à NOx.

Un autre axe de progrès est l'approche *downsizing*, c'est-à-dire la réduction de cylindrée avec maintien des performances, en particulier du couple à bas et haut régime, avec une utilisation systématique de la turbosuralimentation, qui pourrait conduire à des réductions de l'ordre de 5 à 10 %. Associé à de l'injection directe et à de la distribution variable, ce principe permettrait d'envisager des gains de 25 à 30 %.

**Aujourd'hui, les avancées technologiques et les recherches en cours autour des moteurs à combustion interne permettent donc d'espérer des gains en consommation (selon les solutions) de 10 à 30 % par rapport au moteur conventionnel actuel.**

Certains de ces progrès sont toutefois limités par la nécessité de contrôler les émissions de NOx, notamment. Pour s'affranchir de cette contrainte, de nouveaux modes de combustion font actuellement l'objet de recherches intensives au plan européen : « HCCI » (*Homogeneous Combustion Compression Ignition*) pour le moteur Diesel ou « CAI » (*Controlled Auto Ignition*) pour le moteur à essence. Ces deux modes aboutissent à des réductions de l'ensemble des polluants de plus de 90 %.

**La prochaine évolution attendue dans la filière « moteurs à combustion interne » est le véhicule hybride.** Il s'inscrit dans la continuité par rapport au véhicule à combustion interne actuel. Il ne nécessite pas en effet de modifications ou d'évolutions lourdes des infrastructures de distribution et il offre de bonnes opportunités de réduction des consommations d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> au niveau du

véhicule. Les solutions alternatives de type véhicule hybride (essence ou Diesel) permettent d'envisager 10 à 40 % en termes de gain de consommation par rapport au moteur conventionnel actuel, selon les technologies mises en œuvre. Toyota a été le premier constructeur à avoir proposé un véhicule hybride essence dans sa gamme à la fin des années 90 : il s'agit de la Toyota Prius dont le constructeur japonais va proposer la deuxième version. Honda et Nissan proposent également un véhicule hybride dans leurs gammes respectives. Le constructeur américain General Motors projette de commercialiser des véhicules pour les modèles fortement consommateurs de carburants (4x4, SUV). Quant aux Européens, ils portent pour l'instant un intérêt limité pour ce type de motorisation en raison du succès commercial et technologique du Diesel.

### **jusqu'aux solutions de rupture technologique sur le long terme**

Sur le long terme, deux types de solution de rupture se dégagent autour du moteur électrique : les véhicules utilisant des batteries ou tout autre système pour le stockage de l'électricité, ou des piles à combustible (PAC) produisant l'électricité nécessaire à bord du véhicule.

**Les véhicules électriques ont suscité beaucoup d'intérêt dans le passé du fait de leurs avantages intrinsèques lors de la prise de conscience des problèmes de pollution locale.** Cette motorisation présente plusieurs avantages : aucune émission de polluants, des émissions sonores très réduites et une conduite urbaine agréable. En revanche, cette filière présente une série de difficultés : un temps de recharge trop long, des performances limitées et une autonomie beaucoup trop réduite de ces véhicules, de 100 à 200 km en usage réel. Cette situation est essentiellement due aux performances encore insuffisantes des batteries utilisées pour le stockage de l'énergie électrique à bord du véhicule. Malgré la mise en œuvre de nouvelles technologies (batteries Nickel-Cadmium, Nickel métal hydrure ou Lithium-ion), celles-ci présentent encore des énergies spécifiques (en Wh/kg) dans un rapport 1 à 100 avec les carburants liquides. Le véhicule « pur » électrique reste donc très en deçà des performances d'un véhicule conventionnel et est fortement concurrencé par le véhicule hybride et la pile à combustible.

**De fait, l'avenir de l'hydrogène dans les transports est très lié à celui des piles à combustible :** en effet, si en termes de CO<sub>2</sub> l'efficacité demeure excellente, son utilisation dans un moteur conventionnel offre peu d'avantages en termes de consommation d'énergie et de rejets de polluants tels que les oxydes d'azote. En revanche, le coût au niveau du véhicule est plus réduit.

## Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme

Sans autres émissions que de la vapeur d'eau (dans le cas d'hydrogène embarqué), le véhicule à PAC fonctionnant à l'hydrogène peut apparaître, au premier abord, comme une réponse au problème des émissions de gaz à effet de serre et une alternative au véhicule à batterie en tant que véhicule « zéro émissions ».

Mais le développement de la filière PAC se heurte toutefois, quelle que soit la solution étudiée (hydrogène stocké à bord du véhicule ou hydrogène produit à bord du véhicule), à plusieurs difficultés majeures :

- Dans le cas d'une production centralisée d'hydrogène, il faut mettre en place les infrastructures de production, un véritable réseau de distribution et des technologies de stockage embarquées d'hydrogène. Dans ce cas, le bilan CO<sub>2</sub> de la filière est complètement dépendant du mode de production de l'hydrogène et/ou du développement de la capture/séquestration du CO<sub>2</sub>.
- Dans le cas de solutions embarquées, il reste à mettre au point des technologies de production de l'hydrogène compatibles avec les contraintes de fonctionnement d'un véhicule (démarrage, fonctionnement transitoire, etc.) et à sélectionner le carburant liquide adéquat (méthanol, éthanol, naphta, etc.). En produisant l'hydrogène à bord du véhicule, le bilan CO<sub>2</sub> ne présente pas nécessairement d'avantages significatifs par rapport aux autres solutions. Il semble que General Motors ait décidé d'écarter définitivement cette solution de son programme de R&D et que le « *Department of Energy* » américain devrait se prononcer sur cette option au cours de l'année 2004.

**Enfin, un des freins majeurs au développement de la PAC est son coût relativement élevé.** Le coût des piles fabriquées aujourd'hui (de type PEM ou basse température) est supérieur à 3000 €/kW à comparer aux 30 à 50 €/kW pour les moteurs à combustion interne conventionnels, produits en séries. Lorsqu'on envisage la mise en production de plusieurs centaines de milliers d'exemplaires de PAC, l'avantage reste au moteur à combustion interne puisque le coût de production des piles (hors moteur électrique et système de stockage) reste compris entre 100 et 200 €/kW<sup>(1)</sup>, soit trois à quatre fois plus que celui d'un moteur conventionnel, même si certaines études retiennent des scénarios où ce coût serait ramené dans la fourchette 50 à 100 €/kW.

Cependant, la PAC représente une option sur le long terme où les progrès technologiques sont possibles et peuvent laisser entrevoir l'amélioration des performances et la diminution des coûts.

(1) Sources : DOE et DTI, « *DFMA Cost Estimates of Fuel-Cell/Reformer Systems at Low/Medium/High Production Rates* », Brian D. James, Greg D. Ariff, Reed C. Kuhn Future Car Congress 2002, 4 June 2002.

### Deux critères de décision : les bilans environnementaux et économiques des différentes solutions alternatives

La comparaison de l'ensemble de ces filières doit se faire en intégrant essentiellement le bilan en termes d'effet de serre (les bilans énergétiques en MJ/100 km et les émissions de CO<sub>2</sub> exprimées en gramme de CO<sub>2</sub> équivalent par km) et le coût économique.

De la récente analyse des filières de carburants conventionnels et alternatifs menée au niveau européen « *Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context* », publiée récemment et réalisée dans le cadre d'une association des constructeurs automobiles européens (EUCAR), de la Commission européenne (JRC ISPRA) et des pétroliers (CONCAWE) et en prenant comme référence le gazole avec moteur à injection directe. Le tableau 1 en présente les résultats les plus marquants. Les valeurs sont bien sûr indicatives car elles reflètent de nombreuses hypothèses qui peuvent être discutées.

Pour chacune de ces sources d'énergie, dès que l'on envisage l'option « hybride », le gain en termes d'émissions de CO<sub>2</sub> par rapport aux motorisations classiques peut aller de 10 % pour l'hydrogène jusqu'à 25-30 % pour les solutions classiques (essence, gazole) ou alternatives (gaz naturel, biocarburants, etc.).

Pour les filières avec moteur à combustion interne, les meilleurs résultats en termes de CO<sub>2</sub> sont obtenus à l'horizon 2010 avec les solutions utilisant la biomasse, le gaz naturel et les systèmes hybrides.

À côté de ce bilan environnemental, il est important d'examiner les coûts des différentes solutions alternatives pour évaluer leur performance économique. Le tableau 2 reprend l'ensemble des coûts de production et de distribution issus de la même étude européenne : les premiers sont liés au mode de production et au coût de l'énergie primaire utilisée alors que les seconds vont plutôt représenter les différences dues à l'état physique du carburant (liquide ou gazeux) et aux conditions d'exploitation (toxicité, sécurité, etc.). Ces coûts sont calculés sans prendre en compte l'investissement initial dans le véhicule.

À titre d'exemple, le surcoût d'un véhicule au gaz naturel par rapport à un véhicule équivalent essence pourrait être réduit à terme dans une fourchette allant de 1200 à 2000 € (Rapport 2003 de l'*Alternative Fuel Contact Group* pour la Commission Européenne). Pour les PAC de type PEM, les ordres de grandeur sont d'une autre ampleur, ainsi le surcoût lié à la seule présence de platine (20 €/kW) sur la membrane représente les deux tiers du coût d'un moteur à essence

# Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme

Tableau 1  
Bilan CO<sub>2</sub> « du puits à la roue » des carburants conventionnels et alternatifs

Énergie	Origine	Moteur	Énergie MJ/100 km	g éq. CO <sub>2</sub> /km	g CO <sub>2</sub> /km relatif
Diesel 2002	Pétrole	D/ID*	212	164	1,00
Essence 2002	Pétrole	AC*	255	196	1,20
Diesel hybride 2010	Pétrole	D/ID + FAP	171	131	0,80
Essence hybride 2010	Pétrole	AC/ID	186	141	0,86
Diesel FT 2010	Gaz naturel	D*/ID + FAP	216	164	1,00
Diesel FT 2010	Bois	D*/ID + FAP	393	20	0,12
GNC 2002	Gaz naturel	AC*	256	152	0,93
GNC 2010		AC*	216	127	0,77
Éthanol 2010	Betterave	AC*/ID	529	97	0,59
EMHV 2010	Oléagineux	D*/ID + FAP	382	90	0,55
H <sub>2</sub> comprimé	Nucléaire	PAC*	566	7	0,04
H <sub>2</sub> comprimé	Gaz naturel (mix UE)	PAC*	173	98	0,60
H <sub>2</sub> liquide	Gaz naturel (mix UE)	PAC*	221	135	0,82
H <sub>2</sub> liquide	Électricité UE	PAC*	491	222	1,35

\* AC : allumage commandé – D : Diesel – ID : injection directe – FAP : filtre à particule – PAC : pile à combustible.

Source : « Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context », EUCAR, JRC, CONCAWE, November 2003

Tableau 2  
Coût de revient au kilomètre des différents carburants

	Consommation (MJ/100 km)	Coût du carburant (€/GJ HT)	Coût (€/100 km)
MCI* + essence 2002	224	8	1,8
MCI* + gazole 2002	183	8	1,5
MCI* hybride + gazole 2010	148	8	1,2
MCI* + GNC 2010	193	7,5	1,4
PAC + H <sub>2</sub> comprimé ex-gaz	84	25	2,1
PAC + H <sub>2</sub> comprimé ex-charbon	84	32	2,7
PAC + H <sub>2</sub> comprimé ex-biomasse	84	37	3,1
PAC + H <sub>2</sub> comprimé ex-électricité France	84	42	3,5
MCI* + EMHV 2002	183	12	2,2
MCI* + éthanol 2002	224	21	4,7
Diesel FT ex-bois 2002	183	20	3,7

\* MCI : moteur à combustion interne.

Source : IFP

(30 €/kW) ; plus globalement les estimations les plus favorables aboutissent à des « coûts de production à terme » (incluant les effets de masse et des avancées technologiques) de l'ordre de 100 à 200 €/kW (contre plus de 3000 €/kW aujourd'hui), soit un surcoût au niveau du véhicule de 5000 à 10 000 €.

Cette analyse montre que le surcoût aux 100 km par rapport aux solutions conventionnelles varie de 15 à plus de 100 % pour les options hydrogène/PAC, avec l'hypothèse pourtant très favorable que la PAC est proposée à un coût équivalent à celui des moteurs à combustion interne.

L'éthanol, dont le coût est trois fois supérieur à celui des carburants classiques, est pénalisé par son contenu énergétique qui est inférieur d'environ 1/3 à celui de l'essence. Seule la mise en place d'une défiscalisation peut donc permettre aux biocarburants d'être aujourd'hui compétitifs. D'autant plus que les biocarburants bénéficient en outre d'une aide indirecte via la Politique Agricole Commune (PAC). Enfin, si la fabrication de carburants de synthèse à partir de biomasse présente un bilan CO<sub>2</sub> très avantageux, le coût de revient pour 100 km est du même ordre que pour la filière éthanol.

Dans l'étude européenne précédente, un scénario de pénétration de 5 % des solutions alternatives a également été testé

## Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme

au niveau européen : le coût exprimé en euros par tonne de CO<sub>2</sub> évitée varie alors de 200 €/t pour les solutions hybrides, à 300 €/t pour les biocarburants, jusqu'à 600 €/t pour l'hydrogène embarqué et 5000 €/t dans le cas d'une production d'hydrogène à bord du véhicule. Les solutions alternatives vont donc nécessiter des progrès significatifs pour espérer être compétitives.

### Un avenir ouvert sur une multitude de solutions potentielles

En ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, le transport routier doit faire face à un défi majeur pour les cinquante prochaines années : infléchir la tendance à la hausse des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici à 2030. À court terme, l'utilisation des biocarburants offre l'avantage d'avoir l'impact le plus rapide sur les émissions de gaz à effet de serre. Les solutions hybrides semblent présenter également

un bon compromis environnement/coût. À plus long terme, la compétition est ouverte entre le véhicule à moteur et toutes ses améliorations techniques envisageables et un véhicule électrique où l'énergie est stockée à bord du véhicule, soit dans les batteries améliorées, soit en utilisant un système PAC-H<sub>2</sub>.

Cependant, la réponse à l'effet de serre ne sera pas uniquement technologique. Il faudra prendre en compte les composantes « sociétales » et « comportementales » qui auront leur importance en initiant des solutions de réorganisation des transports (promotion du rail, aménagement du territoire).

*Bernard Bensaid  
bernard.bensaid@ifp.fr*

*Jean-François Gruson  
j-f.gruson@ifp.fr*

*Manuscrit définitif remis le 15 décembre 2003*

